

В.Б. Струтинський¹, д-р.техн.наук, проф., В.М. Дрозденко², О.Я. Юрчишин¹, канд.техн.наук
1 - НТУ України «Київський політехнічний інститут» м. Київ, Україна
2 - ВАТ "Веркон", м. Київ, Україна

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВІБРАЦІЙНОГО ПОЛЯ ЗАГОТОВКИ ТОКАРНОГО АВТОМАТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ ПРИ ВИПАДКОВИХ НАВАНТАЖЕННЯХ СИЛАМИ РІЗАННЯ

Рассмотрены токарные автоматизированные комплексы разработки Киевского станкостроительного концерна «Веркон». Определены конструктивные особенности шпиндельного узла станка и предложена изменяемая во времени динамическая модель заготовки как системы с распределенными параметрами. Разработаны математические модели заготовки, учитывающие диссипацию энергии при колебаниях. Проведено моделирование вибрационного поля заготовки при стохастических нагружениях.

The lathe automated complexes of development of the Kiev machine-tool business concern «Verkon» are considered. The structural features of spindle knot of machine-tool are certain and the dynamic model of purveyance as systems is developed with the up-diffused parameters. The mathematical models of the system are developed purveyances, taking into account dissipation of energy at vibrations. The design of the oscillation field of purveyance is conducted at stochastic loadings.

Вступ.

Актуальність досліджень. Динамічні процеси у металорізальних верстатах суттєвим чином впливають на точність обробки. Тому дослідження динамічних коливальних процесів при обробці деталей на токарних автоматизованих комплексах є актуальною науковою проблемою.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Динамічні процеси при обробці деталі є результатом динамічних дій окремих підсистем. Найбільш важливою є підсистема шпинделя із механізмом затиску та заготовкою.

Динамічні процеси в шпиндельній групі верстата відзначаються значною складністю. Тому для їх дослідження ефективним є математичне моделювання динамічної системи. Підвищення точності і достовірності математичних моделей досягається врахуванням розподіленості параметрів у динамічній системі.

Зв'язок проблеми із важливими науковими і практичними завданнями. Математичне моделювання вібраційного поля заготовки безпосередньо пов'язане із завданнями вдосконалення процесу обробки на токарному автоматизованому комплексі. Врахування випадкових навантажень і розподілених параметрів суттєвим чином підвищує достовірність аналізу динамічних процесів, що мають місце при обробці деталей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В результаті аналізу літературних джерел встановлено, що питанням дослідження стохастичних динамічних процесів у металорізальних верстатах присвячено ряд публікацій [1, 2]. Як правило, розглядалися динамічні системи із зосередженими масами. Результатів досліджень динамічної системи заготовки при стохастичних навантаженнях із врахуванням розподіленості параметрів в літературних джерелах не виявлено.

Вирішення невирішеної раніше частини загальної проблеми. Заготовка, яка встановлена в цанговому патроні, періодично опирається в кінцевій частині шпинделя. Заготовка має значний динамічний дисбаланс, а її коливання залежать від умов опирання, що мають невизначений характер. Встановлення параметрів вібраційного поля заготовки при невизначених умовах опирання та стохастичних навантаженнях являє собою невирішену раніше частину загальної проблеми.

Мета і задачі досліджень. Метою досліджень є визначення параметрів вібраційного поля пруткової заготовки при стохастичних навантаженнях і врахуванні розподіленості параметрів заготовки при змінних в часі умовах її опирання.

Задачами досліджень є аналіз динамічної системи шпиндельного вузла верстата і розробка математичної моделі для розрахунку вібраційного поля, визначення частотних характеристик заготовки та знаходження на цій основі параметрів вібраційного поля заготовки при дії випадкових збурень, обумовлених силами різання та ударними навантаженнями на заготовку.

Виклад основного матеріалу досліджень.

Характеристика токарних автоматизованих комплексів. Токарні автоматизовані комплекси розробки Київського верстатобудівного концерну «Веркон» побудовані на базі модулів КА-608 і утворюють параметричний ряд ТАК-101, ТАК-102, ТАК-103. Комплекси розрізняються між собою числом модулів та відповідним оснащенням (рис. 1).

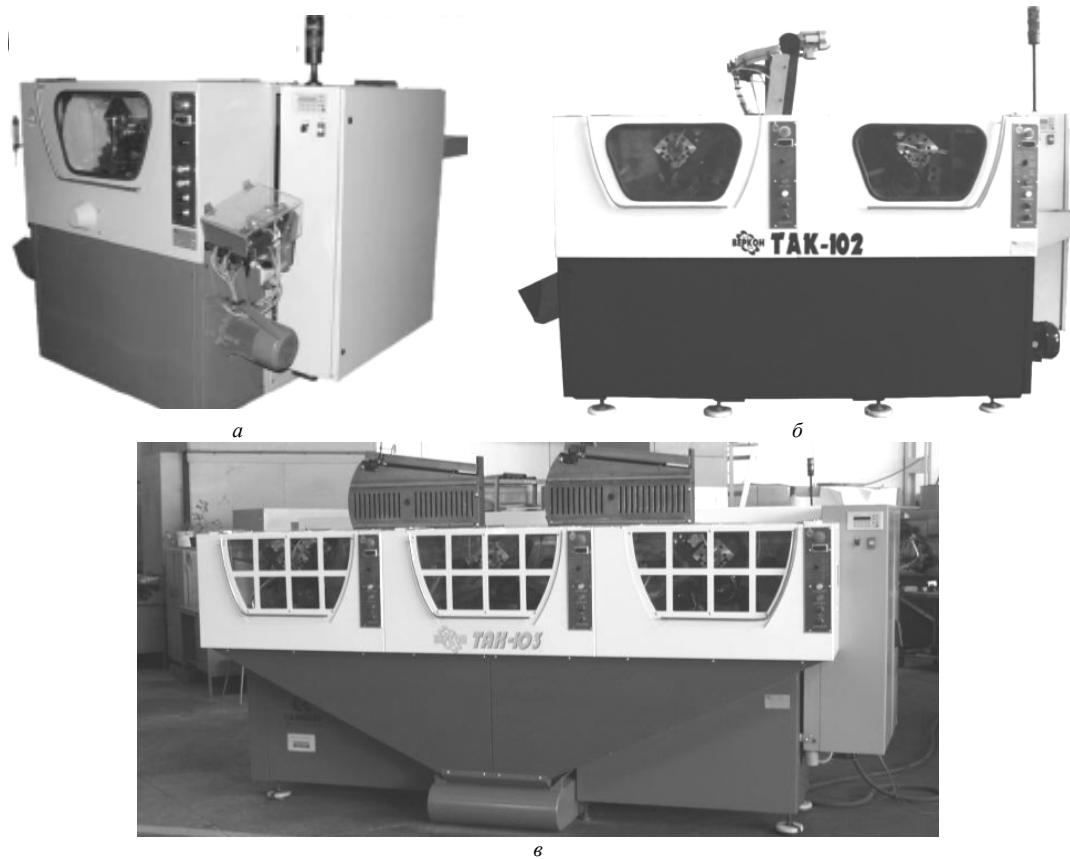


Рис. 1. Зовнішній вигляд токарних автоматизованих комплексів ТАК 101 (а), ТАК 102 (б) і ТАК 103 (в)

Кожен верстат складається із станини (однієї чи декілька); кількох модулів (агрегатів, які розміщені на одній, або на декількох станинах; транспортера стружки; системи охолодження зони різання (автономної або централізованої); електрошкафи, в якій розміщена апаратура керування, контролери, приводи з частотним регулюванням швидкості, пуско-регулююча апаратура; огороження зони різання і рухомих частин.

У верстатах ТАК-101, ТАК-102 перший блок працює із прутковою заготовкою.

Поряд з підтримуючим пристроєм змонтований автоматичний пристрій завантаження з накопичувачем на 10 прутків. Заготовка автоматично покровоно подається в лівий шпindel (ТАК 102) обробляється і відрізається.

Для комплексу ТАК-102 заготовка автоматично передається (з переворотом) на правий шпindel для подальшої обробки. Комплекси мають лотки-накопичувачі напівфабрикатів (заготовок).

Верстати вбудовуються в автоматичні лінії, при цьому верстати монтуються на загальній основі по одному (ТАК-101), два (ТАК-102) верстати. До складу лінії входять: вхідний лоток-накопичувач; вихідний лоток-накопичувач; транспортно-передавальна система з накопичувачами між верстатами.

Технічні характеристики верстата ТАК-102 приведені в табл. 1.

Таблиця 1

Технічні параметри токарного автоматизованого комплексу ТАК-102

№ п/п	Найменування параметрів	Одиниці вимірювання	Величина
1	Зовнішній діаметр прутка	мм	30-60
2	Макс. довжина прутка	мм	1000
3	Зовнішній діаметр деталі	мм	30-80
4	Макс. довжина деталі	мм	до 60
5	Розмірні похибки оброблених деталей	мм	0,05
6	Інструмент		Непереточувані пластинки (СМП) твердого сплаву
7	Видалення стружки		1. Транспортером, за межі робочої зони; 2. Через отвір внизу, разом з емульсією.
8	Завантаження і розвантаження деталей		Автоматичне
9	кріплення державки інструменту		Швидкозмінне
10	Частота обертів шпинделя	об/хв	До 4000
11	Величина робочих подач	мм/об	До 0,5
12	Шорсткість поверхні	Rz	2,5
13	Потужність головного приводу	кВт	11

Верстати призначені для роботи в умовах великосерійного і масового виробництва деталей середнього рівня складності. Верстати призначені для токарної обробки з двох сторін заготовок нескладного профілю з максимальним числом переходів до 6, отриманих різними способами (відливки, поковки і т.д.).

Кожен модуль складається з приводів головного руху і подач, які змонтовані в корпусі, автономного вузла змащування; пневмоприводу затиску заготовки; пневмоприводу маніпулятора; супортів (поздовжньої та поперечної подач) (рис. 2).

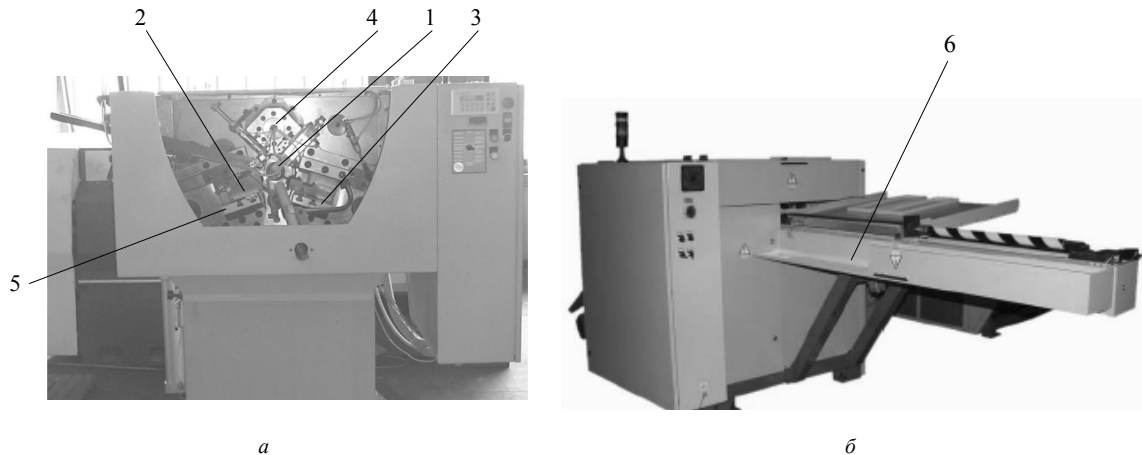


Рис. 2. Зовнішній вигляд верстату TAK-101: а – вигляд спереду із знятим огородженням; б – вигляд ззаду

В робочому просторі верстата розташований шпиндель з патроном 1, два поперечних супорта 2, 3, поздовжній супорт 4 та маніпулятор 5. З тильної сторони верстата розміщено автоматичний пристрій завантаження 6.

Обґрунтування динамічної моделі заготовки. Обробка пруткових заготовок на токарному автоматизованому комплексі (ТАК-101, ТАК-102, ТАК-103) супроводжується виникненням інтенсивних динамічних збурень, обумовлених поперечними коливаннями $y(x)$ пруткової заготовки. Заготовка розміщена в шпиндельному вузлі верстата, закріплена в патроні і вільно опирається на протилежному кінці (рис. 3).

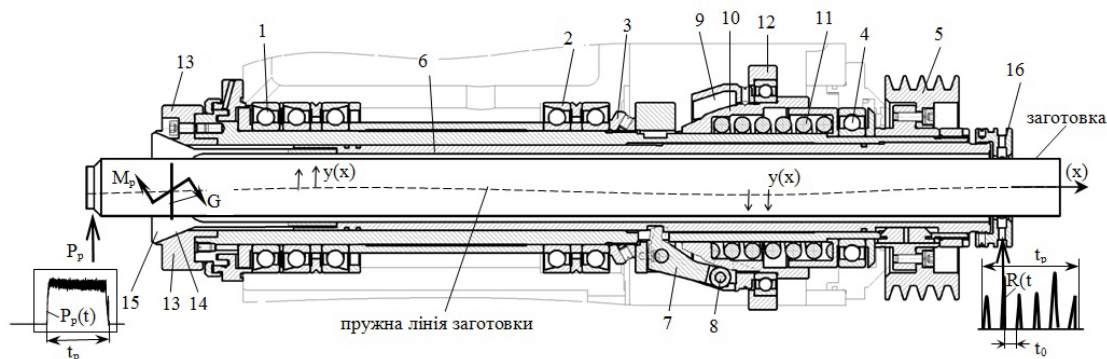


Рис. 3. Шпиндельний вузол модуля комплексу ТАК із встановленою в патроні заготовкою

Передня 1 і задня 2 опори шпинделя мають радіально-упорні кулькові підшипники з попереднім натягом. Натяг підшипників забезпечується гайкою 3. Шпиндель має додаткову опору у вигляді радіального підшипника 4. На кінцевій частині розміщено шків 5 пасової передачі привода головного руху. Механізм затиску заготовки має трубу 6, хвостовик якої з'єднується з цангою. Труба 6 переміщується важелями 7, які мають ролики 8, що взаємодіють з конічною поверхнею 9 втулки 10. При затиску деталі в патроні втулка 10 переміщується вліво пружиною 11. Розтиск деталі здійснюється переміщенням втулки 10 вправо за допомогою вилки 12. Вилка 12 має механічний привод переміщень за допомогою кулачків, встановлених на розподільному валу верстата. Шпиндель оснащено цанговим патроном.

Патрон має корпус 13 із конічною поверхнею 14. З нею взаємодіють зовнішні конічні поверхні губок цанги 15. Цанга переміщується за допомогою розглянутого раніше привода затиску. Заготовка у вигляді прутка або труби встановлюється і затискається в патроні верстата. Затиск заготовки здійснюється в перетині G, який знаходиться в середній частині затискних поверхонь цанги. При обробці довгих заготовок вони підтримуються в задній частині шпинделя, опираючись на кільце 16.

При обробці заготовки відбуваються її інтенсивні поперечні коливання як системи з розподіленими параметрами. Коливання визначаються умовами опирання заготовки. При обробці коротких заготовок мають місце схеми її закріплення із консолю. Для довгих заготовок має місце їх опирання на кільце шпинделя.

При обертанні шпинделя довга заготовка деформується під дією гравітаційних сил. Це приводить до періодичного (по куту повороту шпинделя) контакту заготовки з опорним кільцем в кінцевій частині шпинделя (рис. 4).

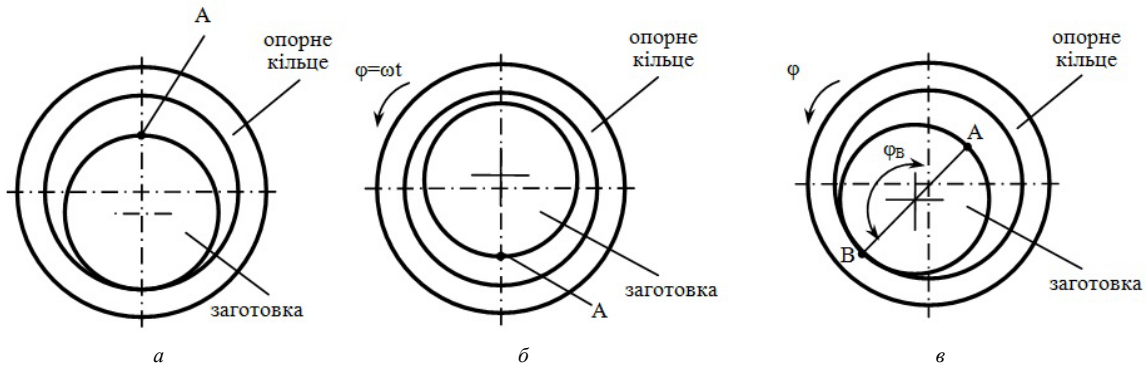


Рис. 4. Взаємодія кінцевої частини заготовки з опорним кільцем, встановленим на шпинделі: а – опирання заготовки при її затиску; б – положення кінцевої частини заготовки при повороті шпинделя на кут 180° ; в – положення заготовки в момент повторного контакту з кільцем (поворот шпинделя на кут $180^\circ + \varphi_B$)

При затиску заготовки в патроні вона буде прогинатись під дією гравітаційних сил і опиратись на кільце, встановлене на шпинделі (рис. 4, а). Поворот шпинделя приводить до відриву заготовки від кільця і вона втрачає контакт із шпинделем (рис. 4, б). При подальшому повороті заготовки на кут $180^\circ + \varphi_B$ вона знову входить в контакт із кільцем (рис. 4, в). Таким чином, на протязі одного оберту шпинделя за час t_0 заготовка має дві принципово різні схеми опирання. Защемлення в патроні з додатковим опиранням в кінцевій частині та консольне закріплення заготовки (рис. 5).

Заготовка навантажена стохастичними навантаженнями. На протязі часу обробки t_p має місце квазістаціонарне випадкове навантаження P_p (Ошибка! Ошибка связи. від сил різання (рис. 5, в). Додатково на заготовку діє періодичне імпульсне (ударне) навантаження Ошибка! Ошибка связи.. Амплітуди імпульсів є випадковими, а період відповідає періоду обертання шпинделя.

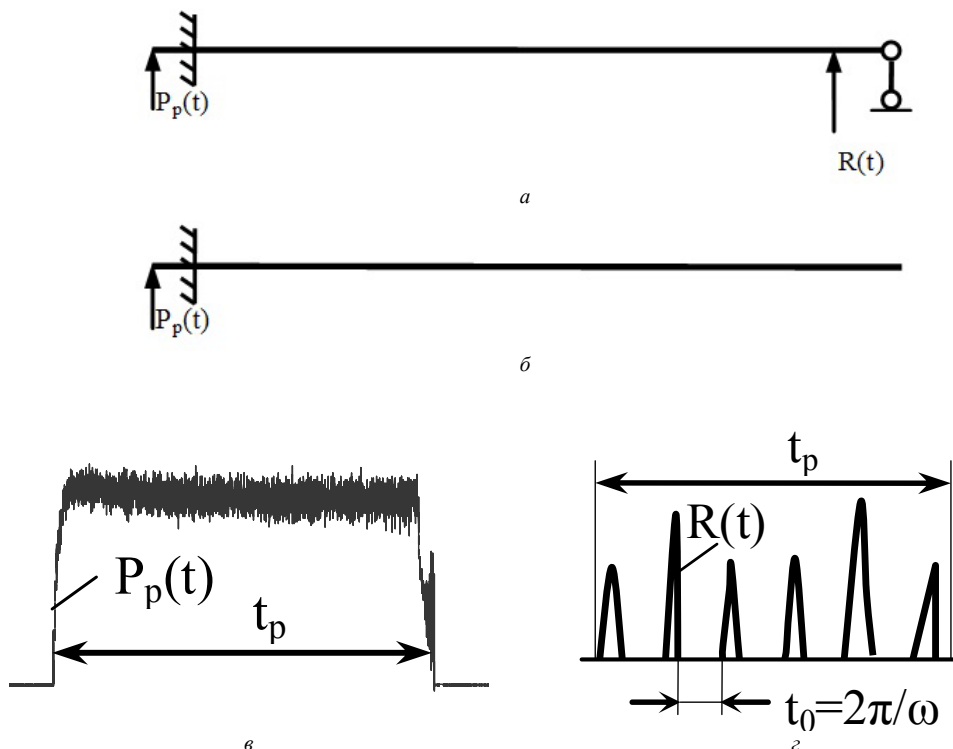


Рис. 5. Схема заготовки як пружного стрижня із защемленим лівим кінцем і шарнірно опертим правим кінцем (а), консольна схема закріплення заготовки (б) та навантаження на заготовку від сил різання (в) і ударні навантаження при контакті заготовки з опорним кільцем (г)

В проміжку між імпульсним навантаженням заготовка здійснює вимушені коливання під дією стохастичних сил різання. Для розрахунку даних коливань розроблена спеціальна математична модель. Модель базується на розгляді власних коливань заготовки як системи з розподіленими параметрами.

Аналіз власних коливань заготовки та побудова її структурної моделі. Поле радіальних переміщень перетинів заготовки визначається нормальними формами коливань, які є різними для різних умов опирання заготовки [4].

Нормальні форми коливань заготовки із защемленим лівим кінцем і шарнірно опертою на правому кінці (див.рис. 5, а) визначаються залежністю [4]:

$$X_i(x) = C \left[K_3 \left(k_i \frac{x}{L} \right) - K_3(k_i) \cdot \frac{K_4 \left(k_i \frac{x}{L} \right)}{K_4(k_i)} \right] \quad (1)$$

де X_i - i -та нормальна форма коливань; C - постійна; K_3 , K_4 - функції Кривої; L - довжина заготовки; x - поточна координата; k_i - i -й корінь частотного рівняння.

Значення коренів частотного рівняння згідно [4] складають

$$k_1 = 3,9266; k_2 = 7,0686; k_3 = 10,2102; k_4 = 13,3518; k_5 = 16,4934;$$

Розраховані по формулі (1) форми коливань подані у вигляді графіків (рис. 6, а).

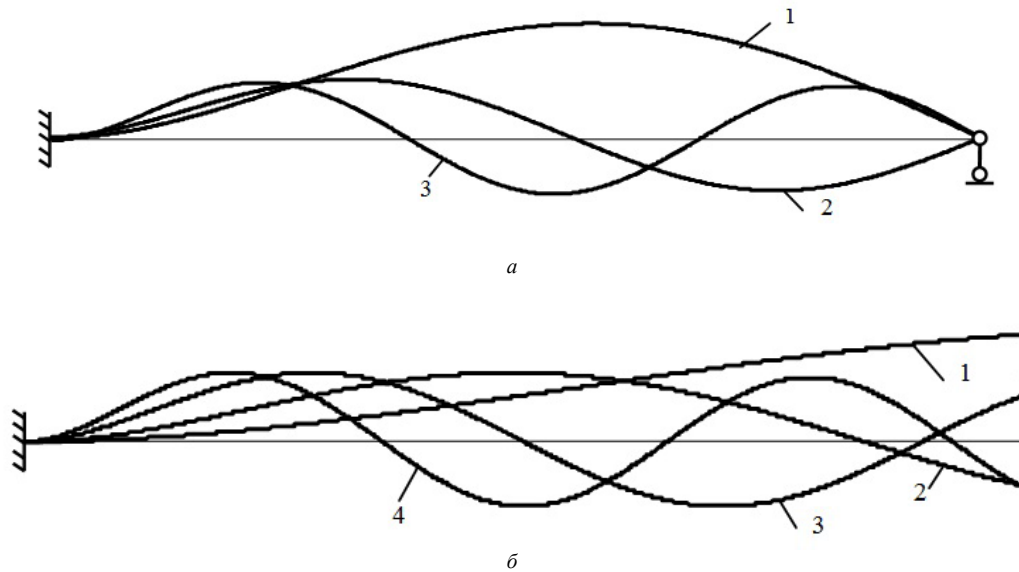


Рис. 6. Нормальні форми поперечних коливань заготовки з розподіленою по довжині масою: а – для зашкеленої заготовки із шарнірною опорою; б – для консольно закріпленої заготовки

На рисунку цифрами позначено номери нормальних форм коливань.

Нормальні форми коливань для консольно закріпленої заготовки (рис. 5, б) розраховуються через функції Кривої згідно залежностей [4]:

$$X_i(x) = C \left[K_3 \left(k_i \frac{x}{L} \right) - K_4 \left(k_i \frac{x}{L} \right) \right] \quad (2)$$

Значення коренів частотного рівняння для даного випадку складає:

$$k_1 = 1,875; k_2 = 4,694; k_3 = 7,855; k_4 = 10,996.$$

Розраховані по формулі (2) перші нормальні форми коливань мають характерний вигляд (рис. 6, б).

Схема опирання заготовки визначає спектр частот власних коливань. Більш високі частоти має заготовка із зашкеленим лівим кінцем, яка шарнірно опирається на правому кінці. Низькі частоти характерні для консольно закріпленої заготовки [4].

Вільні поперечні коливання перетину заготовки як пружного стрижня описуються залежністю

$$y(t, x) = \sum_{i=1}^{\infty} X_i(A_i \cos p_i t + B_i \sin p_i t) \quad (3)$$

де X_i - i -та нормальна форма коливань; p_i - частота, яка відповідає i -тій формі; A_i , B_i - константи, які визначаються із початкових умов.

Розглянемо випадок, коли заготовка в момент часу $t=0$ зазнає імпульсних навантажень. Заготовка не може рухатись миттєво, тому $y(0, x) = 0$. Відповідно, значення констант A_i будуть рівні нулю. Таким чином, при імпульсному навантаженні коливання заготовки без врахування втрат енергії будуть визначені залежністю:

$$y_I(t, x) = \sum_{i=1}^{\infty} X_i \cdot B_i \sin p_i t \quad (4)$$

Константа B_i в даній формулі залежить від енергії імпульса його виду та точки прикладення.

Реакція динамічної системи на імпульсне навантаження являє собою імпульсну характеристику системи (вагову функцію) $w(t)$ [5]. Тому формула (4) визначає набір імпульсних характеристик динамічної системи заготовки у вигляді стрижня із розподіленими по довжині параметрами. Імпульсні характеристики в наборі розрізняються

лише значеннями констант B_i . Дані константи визначають величину імпульсу, його вид та точку прикладення. Константи визначаються із закону збереження імпульса. Для дії одиничного імпульса у вигляді δ -функції Дірака імпульс вхідного навантаження приймається за одиницю.

Згідно [5] задамо початкові умови руху заготовки у вигляді розподілу радіальних швидкостей по довжині заготовки у вигляді $V_k = f_2(x)$. Відповідно до визначення констант B_i будемо мати рівняння:

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^{\infty} X_i B_i p_i$$

Домножимо праву і ліву частину рівняння на X_j і проінтегруємо по довжині

$$\int_0^L f_2(x) \cdot X_j dx = \sum_{i=1}^{\infty} B_i p_i \int_0^L X_i X_j dx$$

Враховуючи умову ортогональності нормальних форм коливань [5], одержимо

$$\int_0^L X_i X_j dx = \begin{cases} 1 & \text{при } i = j \\ 0 & \text{при } i \neq j \end{cases}, \quad B_i = \frac{1}{p_i} \int_0^L f_2(x) X_i dx. \quad (5)$$

Таким чином залежність (4) із визначеними формулою (5) константами B_i являє собою імпульсну характеристику динамічної системи заготовки у вигляді функції часу. Перетворимо її по Лапласу. Одержимо зображення по Лапласу імпульсної характеристики $Y_I(s, x)$, що співпадає з передавальною функцією $W(s, x)$ системи:

$$Y_I(s, x) = L \left[\sum_{i=1}^{\infty} X_i B_i p_i \left(\frac{1}{p_i} \sin p_i t \right) \right] = \sum_{i=1}^{\infty} L X_i B_i p_i \left(\frac{1}{S^2 + p_i^2} \right) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{K_i}{T_i^2 S^2 + 1} = W(s, x) \quad (6)$$

де S – оператор Лапласа; $T_i = \frac{1}{p_i}$ – постійна часу, відповідна i -й формі коливань; $K_i = \frac{X_i B_i}{p_i}$ – коефіцієнт передачі, відповідний i -й формі коливань, $W(s, x)$ – передавальна функція системи від входу, що спричиняє початкову швидкість заготовки $f_2(x) = V_0(x)$.

Одержана передавальна функція відповідає структурній схемі системи (рис. 7, а).

Відповідно структурній схемі із формули (6) шляхом підстановки $S \rightarrow j\omega$, $j = \sqrt{-1}$ знайдена частотна передавальна функція $WJ0(x, \omega)$ та амплітудно-частотна характеристика $W0(x, \omega)$:

$$WJ0(x, \omega) := \sum_{i=1}^5 \frac{K(x, i)}{[(T_i)^2 \cdot \omega^2] + 1}, \quad W0(x, \omega) := \text{mod}[WJ0(x, \omega)]$$

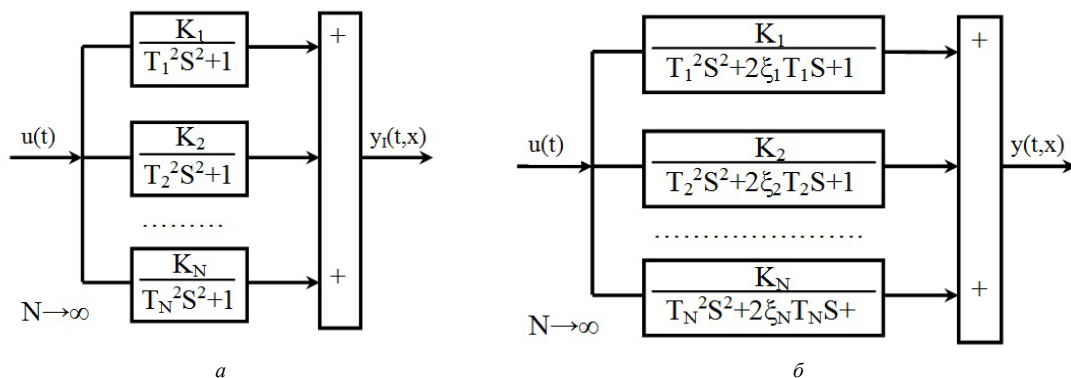


Рис. 7. Структурна схема динамічної системи стрижня без врахування втрат енергії (а) та із врахуванням втрат енергії (б)

При обчисленні характеристик враховано 5 нормальних форм коливань заготовки. Амплітудно-частотна характеристика має розриви другого роду на резонансних частотах (рис. 8, а).

Структурна схема, яка описує незатухаючі коливання заготовки (див. рис. 7, а) являє собою нескінченну кількість паралельно з'єднаних консервативних ланок. Кожна з цих ланок дає нескінченне значення амплітудно-частотної характеристики, відповідне її резонансній частоті. Тому характеристика без врахування втрат енергії (див. рис. 8, а) описує фізично нереальну систему. В реальній динамічній системі заготовки мають місце втрати енергії, які особливо проявляються в області резонансних частот. Для врахування втрат енергії консервативні ланки на структурній схемі змінені на коливальні ланки. При цьому, структурна схема набуває вигляду (рис. 7, б). Відповідно

даній структурній схемі обчислено частотно-передавальну функцію $WJ(x, \omega)$. Дійсну $U(x, \omega)$ та уявну $V(x, \omega)$ частотні характеристики. Це здійснено за наступними формулами:

$$WJ(x, \omega) := \sum_{i=1}^5 \frac{K(x, i)}{i - [(T_i)^2 \cdot \omega^2] + 2 \cdot \xi \cdot T_i \cdot i \cdot \omega + 1}, \quad i = \sqrt{-1}, \quad V(x, \omega) := \text{Im}(WJ(x, \omega))$$

$$U(x, \omega) := \text{Re}(WJ(x, \omega)) \quad (7)$$

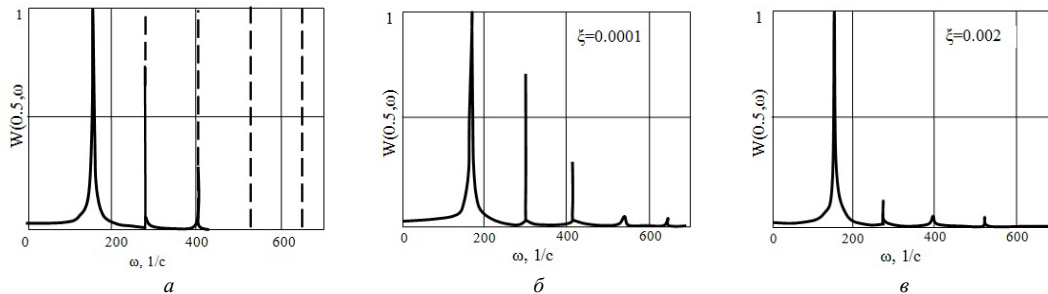


Рис. 8. Амплітудно-частотна характеристика, обчислена для середнього перетину заготовки: а – без врахування втрат енергії; б – з врахуванням втрат енергії при параметрі затухання $\xi=0.0001$; в - при параметрі затухання $\xi=0.002$

Використовуючи знайдені частотні характеристики (7) обчислено амплітудно-частотну $W(x, \omega)$ та фазочастотну $\psi(x, \omega)$ характеристики:

$$W(x, \omega) := \sqrt{(U(x, \omega))^2 + (V(x, \omega))^2}, \quad \psi(x, \omega) = \text{arctg} \frac{V(x, \omega)}{U(x, \omega)}, \quad (8)$$

Параметри затухання ξ , які входять в передавальні функції (7) елементів структурної схеми є незначними, тому що рівень дисипації енергії в заготовці є достатньо малим. Шляхом чисельного експерименту встановлено, що параметр затухання складає $\xi=0,0001 \dots 0,002$. При параметрі затухання $\xi=0,0001$ обчислена амплітудно-частотна характеристика мало відрізняється від характеристики системи без втрат енергії (рис. 8, б). При збільшенні параметра затухання до значення $\xi=0,002$ резонансні піки на амплітудно-частотній характеристиці зменшуються в кілька разів. Це особливо проявляється на високих частотах, де резонансні піки майже зникають (рис. 8, в). Тому для математичного моделювання вібраційного поля заготовки можна використати математичну модель у вигляді нескінченної суми коливальних ланок, параметри затухання яких складають $\xi=0,0001 \dots 0,0002$.

Вимушені коливання заготовки при випадкових збуреннях. Із використанням знайдених частотних характеристик заготовки визначено її динамічні переміщення під дією стохастичних збурень. Основними збуреннями є випадкові значення сили різання та ударні навантаження, які мають місце при контакті заготовки із опорним кільцем.

Стохастичні динамічні збурення від сил різання згідно [6] подані у вигляді канонічного розкладу випадкового процесу по системі взаємно ортогональних гармонічних функцій у вигляді

$$v_x(t) := \sum_{k=1}^{77} (u_k \cdot \cos(k \cdot \omega_0 \cdot t) + v_k \cdot \sin(k \cdot \omega_0 \cdot t)) \quad (9)$$

де ω_0 – деяке базове значення частоти, u_k і v_k - некорельовані центровані випадкові величини із нормальним законом розподілу.

Вони задані за допомогою генератора випадкових чисел (рис 9).

Переміщення перетину заготовки, який знаходиться на відстані x від патрона буде визначено залежністю [7]:

$$y_s(t, x) := \sum_{k=1}^{77} [W(x, k \cdot \omega_0) \cdot (u_k \cdot \cos(k \cdot \omega_0 \cdot t + \psi(x, k \cdot \omega_0)) + v_k \cdot \sin(k \cdot \omega_0 \cdot t + \psi(x, k \cdot \omega_0)))] \quad (10)$$

де $W(x, k \cdot \omega_0)$, $\psi(x, k \cdot \omega_0)$ - амплітудно-частотна та фазочастотна характеристики заготовки при певних умовах опирання.

Проведено обчислення динамічних переміщень середнього перетину заготовки при її защемленні на кільце (рис. 10б) при її консольному закріпленні (рис. 10, в).

Розрахунок переміщень перетинів заготовки відповідає процесам, які близькі до гармонічних коливань. Вимушені коливання заготовки при випадкових збуреннях близькі до власних коливань, що відповідають першим нормальним формам. Найвні незначні відхилення від гармонічного закону переміщення перетину заготовки пояснюються впливом останніх нормальних форм.

При ударі заготовки по опорному кільцю має місце зміна параметрів коливального руху заготовки. Вони проявляються в зміні частотних характеристик в формулі (10). При цьому, переміщення перетинів заготовки на протязі одного оберту шпинделя розраховані згідно логічної конструкції:

$$yu(t,x) := \begin{cases} ys(t,x) & \text{if } t \leq \varphi_B / \omega \\ ysl(t,x) & \text{if } t > \varphi_B / \omega \\ ys(t,x) & \text{if } t > \varphi_C / \omega \end{cases} \quad (11)$$

де φ_B – кутове положення точки на опорному кільці, в якій має місце удар заготовки по кільцю; φ_C – кут повороту шпинделя, при якому закінчується контакт заготовки із кільцем; ω – кутова швидкість обертання шпинделя, y_{S1} – поперечні переміщення перетину заготовки, яка защемлена в патроні і має додаткову шарнірну опору.

	0		0
0	5.975	0	43.774
1	-49.807	1	176.034
2	5.624	2	-64.726
3	-81.999	3	55.104
4	-4.726	4	154.648
5	-25.15	5	-182.164
6	1.921	6	130.793
7	178.585	7	-104.893
8	-7.228	8	45.915
9	-46.935	9	-105.224
10	103.573	10	-124.215
11	139.134	11	42.407
12	-146.68	12	-191.658
13	128.783	13	-12.394
14	-116.585	14	41.322
15	...	15	...

$u := rnorm(100,0,100)$ $v := rnorm(100,0,100)$

Рис. 9. Випадкові коефіцієнти канонічного розкладу силового навантаження на заготовку при різанні

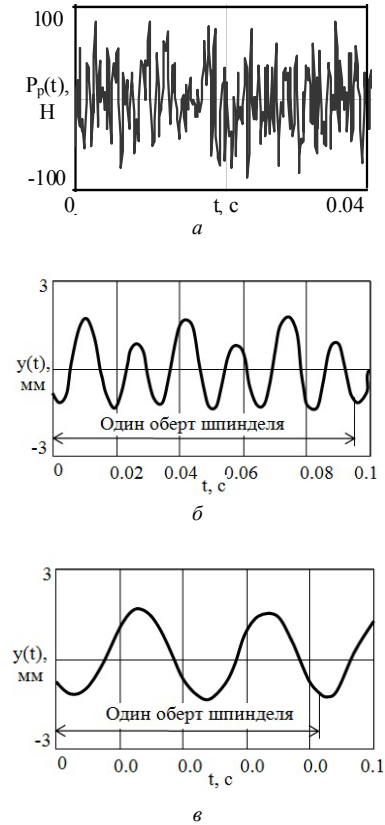


Рис. 10. Випадкова сила різання, що діє на заготовку (а), коливання середнього перетину заготовки при опиранні її краю (б) та коливання консольної заготовки (в)

Переміщення $y_{S1}(t,x)$, обчислюється за формулою (10), в якій частотні характеристики (8) відповідають защемленій в патроні заготовці, яка додатково опирається на шарнірну опору.

Залежність (11) відображає зміну в часі виду математичної моделі. Згідно залежності (11) виконано математичне моделювання динамічних переміщень заготовки в різних перетинах (рис. 11).

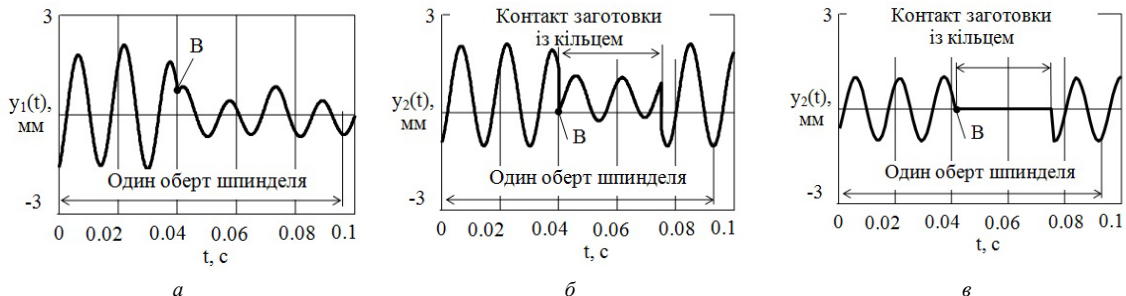


Рис. 11. Переміщення окремих перетинів заготовки при ударних навантаженнях, що мають місце в контакті заготовки з кільцем: а – середній перетин; б – перетин на відстані від патрона рівній 2/3 довжини заготовки; в – перетин в області опорного кільця

Із аналізу результатів математичного моделювання випливає, що при ударі заготовки по кільцю (точка В) має місце зміна характеру руху перетинів заготовки. Для перетинів близьких до середини заготовки (див.рис. 11 а, б) в результаті удару в точці В має різка зміна швидкості перетину. В подальшому рух заготовки згладжується.

Для перетину заготовки, який розташований в околиці опорного кільця має місце зупинка заготовки при її контакті з кільцем (див. рис. 11, в).

Рух перетинів заготовки у радіальному напрямку обумовлює виникнення складного просторового переміщення осі заготовки, яка обертається разом із шпинделем. В нерухомій системі полярних координат переміщення центра перетину заготовки відбувається по петле подібних кривих (рис. 12, а).

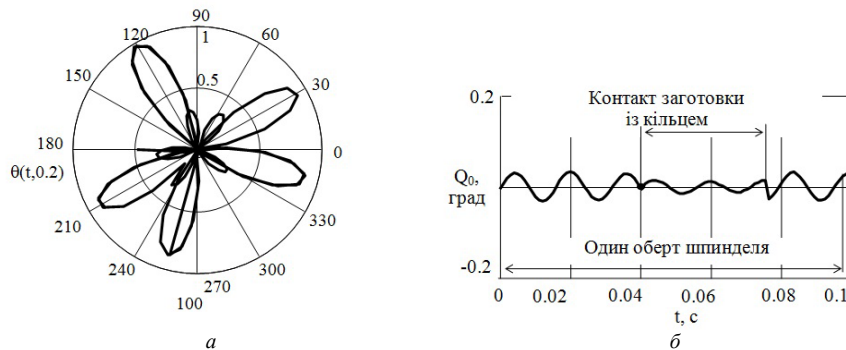


Рис. 12. Переміщення центрального перетину заготовки в нерухомій системі координат (а) та поперечно-кутові переміщення заготовки в околиці цапгового патрона (б)

Наявна деяка асиметрія петле подібних кривих, яка обумовлена ексцентриситетом осі обертання перетину заготовки в часі.

В процесі математичного моделювання додатково визначені кутові переміщення перетинів заготовки. Вони знайдені шляхом диференціювання залежності (11) і обчислені за формулою:

$$\Theta(t, x) = \frac{dyu(t, x)}{dx}$$

Обчислені значення кутів повороту окремих перетинів, зокрема кут повороту заготовки в околиці патрона $\Theta_0(t) = \Theta(t, 0)$ (рис. 12, б). Із аналізу графіка випливає, що при ударі заготовки по опорному кільцю виникають різкі зміни кутового положення заготовки в патроні. Це приводить до значних момент них навантажень, а відповідно, зниження динамічної точності обробки.

Висновки.

1. Для дослідження динамічних коливальних процесів доцільно використати динамічну модель заготовки як системи з розподіленими параметрами, врахувавши періодичні зміни умов опирання заготовки при обертанні шпинделя.

2. Математична модель заготовки подана у вигляді графа зв'язку (структури), що включає нескінченну кількість коливальних ланок, коефіцієнти передачі яких пропорційні власним нормальним формам коливаль, постійні часу обернено пропорційні власним частотам коливаль по відповідним формам, а параметр затухання має значення $\xi=0.0001..0.0002$.

3. Для моделювання вібраційного поля заготовки випадкова збурюючі дія відповідає канонічному розкладу випадкового процесу по системі гармонічних функцій. При цьому, вібраційне поле заготовки, одержано у вигляді полігармонічного процесу, амплітуди складових якого залежать від амплітудно-частотної характеристики заготовки, а фази гармонік залежать від фазо-частотних характеристик заготовки.

4. Періодична зміна умов опирання заготовки суттєвим чином ускладнює її вібраційне поле. При ударі заготовки по опорному кільцю відбувається різка зміна швидкості руху перетинів заготовки, але ці зміни локалізовані в обмеженому інтервалі часу і не змінюють суттєво середніх параметрів вібраційного поля.

5. Як напрямком подальших досліджень рекомендується врахування просторового руху заготовки як системи з розподіленими параметрами.

Список літератури

1. Струтинський В.Б., Тіхенко В.М. Стохастичні процеси у гідроприводах верстатів: монографія / Одеса: Астропринт, 2009. – 456с.
2. Струтинський В.Б., Дрозденко В.М. Динамічні процеси в металорізальних верстатах: Монографія. - Київ.: Основа-Принт, 2010. – 440с.
3. Струтинський В.Б. Науково-технічні проблеми верстатобудування та їх вирішення при розробці нової гама металорізальних верстатів Київського верстатобудівного концерну / В.Б. Струтинський, В.М.Дрозденко, В.Е.Перфілов, П.О.Піддубний, В.О.Ципоренко, О.В.Литвин, В.М.Гейчук, О.М.Кравець // Вестник НТУУ "КПІ" серия "Машиностроение", Киев, 2008, № 54. – с. 220 – 238
4. Василенко М.В., Алексейчук О.М. Теорія коливаль і стійкості руху: Підручник. – К.: Вища школа, 2004. – 525с.
5. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле / Пер. с англ. Л.Г. Корнейчука / Под ред. Э.И. Григоролюка. – М.: Машиностроение, 1985. – 472 с.
6. Струтинський В.Б. Експериментальне визначення характеристик стохастичного вектора сили різання при точінні / В.Б. Струтинський, У. Хайзель, М.Г. Сторчак, В.М. Дрозденко // Сучасні технології в машинобудуванні: зб.наук.праць. – Вип.3 / Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – С. 114 – 124.
7. Струтинський В.Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки. ЖІПІ, 2001. – 631 с.